干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆准噶尔盆地未开垦盐碱土盐分与盐生植被多样性分析

梁　萌[1,2,3]，　米晓军[1,2,3]，　李晨华[1,2]，　赵　金[1,2]，　王玉刚[1,2]，
马　健[1,2]，　胡江玲[4,5]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；
2. 中国科学院阜康荒漠生态系统国家野外科学观测站，新疆 阜康　831505；3. 中国科学院大学，北京　100049；
4. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐　830054；5. 新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心，新疆 乌鲁木齐　830054）

摘　要：以新疆准噶尔盆地未开垦盐碱土为研究对象，测量土壤含盐量、pH、电导率、八大离子等指标，采用多元统计、主成分分析法（PCA）对采样区盐碱土分布特征与盐生植被多样性进行研究。结果表明：（1）研究区以硫酸盐-氯化物盐土、硫酸盐盐土为主。中、重度硫酸盐-氯化物盐土、硫酸盐盐土以链状或条带状集中分布在昌吉回族自治州、博尔塔拉蒙古自治州。阿勒泰地区的苏打盐土、苏打碱土呈点状分布。（2）昌吉回族自治州以真盐植被为优势种，如梭梭（*Haloxylon ammodendron*）和叉毛蓬（*Petrosimonia sibirica*）；博尔塔拉蒙古自治州以泌盐植被为优势种，如琵琶柴（*Reaumuria songarica*）、骆驼刺（*Alhagi sparsifolia*）。（3）二次多项式较好地表达了土壤盐分与植被多样性关系，土壤含盐量在5~10 mg·g^{-1}之间时，Shannon-Wiener指数、Hurlbert指数、Pielou均匀度指数达到最大值；pH在8.4~9.2范围内，盐生植被物种更为丰富，分布较均匀。（4）盐生植被优势种与土壤性状的PCA分析表明，土壤盐分是影响琵琶柴、梭梭、猪毛菜（*Salsola collina*）、柽柳（*Tamarix chinensis*）分布的关键因子，而刺毛碱蓬（*Suaeda acuminata*）、唐古特白刺（*Nitraria tangutorum*）主要受土壤pH、CO_3^{2-}的影响。本研究为未开垦土地资源的合理利用、生态修复提供理论依据。

关 键 词：未开垦盐碱土；盐分；盐生植被多样性；准噶尔盆地

文章编号：

土壤盐渍化是干旱地区最严重的生态问题之一。相关研究表明全球土壤盐渍化面积在2050年增长将超过50%[1-2]。我国土壤盐渍化面积为1.0×10^8 hm^2，尤以新疆所占比重大，达1336.4×10^4 hm^2[3]。其中新疆准噶尔盆地未开垦盐碱土的面积为49.5×10^4 hm^2，未开垦盐碱土作为土地资源的后备军，对其进行改良与治理成为未来土地利用的研究热点[4]。因此，对新疆准噶尔盆地未开垦盐碱土盐分特征研究具有重要意义。

准噶尔盆地矿产与农业资源丰富，经济占新疆的80%以上[5]，但生态环境脆弱，生态修复研究亟待开展。国外研究者运用模型和VIS-NIR的方法在土壤盐渍化的水分运移与地区盐分状况已有相关报道[6-8]，土壤中易溶性盐基离子随水运移的过程中，盐分呈表层集聚现象，且氯化物盐土表聚性高于硫酸盐土。国内研究者对准噶尔盆地的相关研究多集中在绿洲农业用地[9-11]、湖泊湿地[3,12-13]、荒漠区等小范围区域，研究表明，绿洲地区土壤盐分、盐基离

收稿日期：2021-01-07；　**修订日期**：2021-04-02

基金项目：国家自然科学基金重点项目（41730638-1）；新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心招标课题（XJNURWJD062018A03）；国家科技基础性工作专项（2015FY110500）；新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2019D01A97）资助

作者简介：梁萌（1993-），女，硕士研究生，主要从事荒漠生态系统保护和修复研究. E-mail: liangmeng18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者：胡江玲（1977-），女，博士，副教授，主要从事干旱区资源开发与利用研究. E-mail: hujiangling@xjnu.edu.cn

子具有强空间变异，pH则表现为弱变异，而河流湖泊区、荒漠区的土壤盐分表聚性强。相关性分析表明，总盐分与Cl^-、K^+、Na^+、SO_4^{2-}存在显著相关性。王盼盼等[14]对艾比湖湿地不同盐分梯度条件下植被多样性的研究表明，植被多样性受高盐胁迫的影响而降低，而赵晓英等[15]认为中度水盐干扰生境下群落植被具有较高的多样性。多数关于艾比湖盐碱湿地[16]、伊犁河谷[17-18]、准噶尔盆地边缘植被多样性[19]研究表明，土壤盐度($CaSO_4$、K^+、Cl^-、Ca^{2+})、海拔、坡度、水分、肥力是影响植被分布的关键因子，而关于未开垦盐碱土的盐分与盐生植被覆盖特征研究较少。准噶尔盆地因其独特的自然条件，未开垦盐碱土所占比例大，盐生植被盖度高，种类多，鉴于此对准噶尔盆地盐碱土与盐生植被多样性特征研究具有科学意义。

本文选取准噶尔盆地作为研究区域，结合2018年土样、植被数据，采用主成分分析法(PCA)和多元统计法研究未开垦盐碱土的盐分与植被多样性特征，旨在为生态修复、土地资源合理利用提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

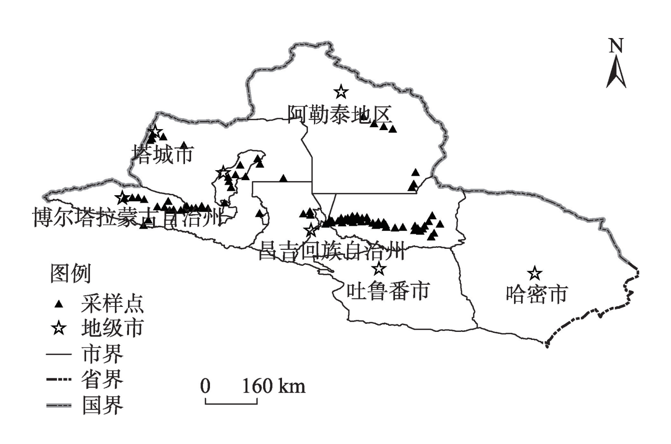
新疆准噶尔盆地地处阿尔泰山和天山之间，位于82°07′52.6″~90°53′54.5″E，44°07′17.6″~47°09′04.3″N，平均海拔739 m，地势由西向东逐渐递减。降水年际变化大，气温波动大，年平均蒸发量(1828 mm)大于年均降水量(416 mm)[20]，属于典型的温带大陆性干旱气候。准噶尔盆地土壤盐分大量聚集，不易淋洗，形成了卤泊滩和盐池洼两大构造侵蚀洼地。采样区盐生植被分布多且广，柽柳(*Tamarix chinensis*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、琵琶柴(*Reaumuria songarica*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等灌木、草木为优势种，同时伴有芦苇(*Phragmites australis*)、新疆绢蒿(*Seriphidium nitrosum*)等。特殊的地形地貌、土壤类型(灰漠土、风沙土)、气候条件，形成了该区域独特的土壤盐渍化现象[21]。

1.2 样品采集与处理

本研究在准噶尔盆地选取未开垦、未破坏的自然盐碱地，实地考察后确定样点。依据行政区域对准噶尔盆地四大地区(昌吉回族自治州、阿勒泰地区、塔城市、博尔塔拉蒙古自治州)进行土壤样品采集，共88个样点，采样点位置如图1所示。

每个样点分两层取土样，分别为0~20 cm、20~40 cm，分别采集土样88个，共计176个。采集的土样各层混合均匀装入样品袋，将土样自然风干、去除动植物残体和石块后磨碎、过2 mm筛。采集的样品制备土与水1:5的浸提液，进行土壤八大离子、pH、电导率、含盐量的测定。土壤含盐量用土壤盐分分析仪(TPY-16A型)测定；pH值用酸度计法(DDSJ-308A)测定；八大离子中，K^+、Na^+含量采用火焰光度法测定，HCO_3^-、CO_3^{2-}含量采用双指示剂-中和滴定法测定，Cl^-含量采用$AgNO_3$滴定法测定，Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}含量采用EDTA滴定法测定，具体分析方法见文献[22]。

依据未开垦盐渍化土壤采样点进行植物调查，每隔50 km设置一个样地，共设置10 m×10 m灌木样方85个、1 m×1 m草本样方420个，用GPS标记样



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图无修改。下同。

图1 准噶尔盆地采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Junggar Basin

地位置。调查盐生植被物种类别、记录植被个体数等植物特征，同时记录环境特征[23]。

1.3 土壤盐渍化的分析方法

本文根据美国土壤盐度的分类体系，盐碱土的分类标准：电导率(EC)>4 dS·m^{-1}，pH<8.5即为盐土，反之则为碱土。当含盐量<5 mg·g^{-1}为非盐渍化土壤，5~10 mg·g^{-1}为轻度盐渍化土壤，10~15 mg·g^{-1}为中度盐渍化土壤，15~20 mg·g^{-1}为重度盐渍化。依据离子分类体系划分盐渍土类型，Cl^-/SO_4^{2-} <0.2为硫酸盐盐土，>2.0为氯化物盐土，0.2~1.0为氯化物-硫酸盐盐土，1.0~4.0为硫酸盐-氯化物盐土。苏打碱土与苏打盐土的分类标准如下：CO_3^{2-}/SO_4^{2-} >5.0为苏打盐土，1.0~5.0为苏打碱土[4]。

1.4 盐生植被多样性的分析方法

依据文献记录鉴定准噶尔盆地未开垦盐碱土盐生植被的名称。盐生植被的筛选标准为：能在含盐量>0.5%的生境中生长的植被。植被盖度采用目测的方法估计盐生植被地上部分垂直投影的面积与样方面积比。盐生植被多样性指标：Shannon-Wiener指数表征盐生植被的富集程度，即群落丰度；Hurlbert指数可表征盐生植被的物种间的相遇几率，即物种多样性；Pielou均匀度指数表示盐生植被不同物种数目的分布特征[19]。

Shannon-Wiener多样性指数(H)：

$$H=3.3219\left(\lg N-\frac{1}{N}\sum n_i \lg n_i\right) \tag{1}$$

Hurlbert多样性指数(d)：

$$d=\frac{N}{N-1}\left(1-\frac{1}{N^2}\sum n_i^2\right) \tag{2}$$

Pielou均匀度指数(Piel)：

$$\mathrm{Piel}=1-\sum\left(\frac{n_i}{N}\right)^2 \Big/ 1-\frac{1}{m} \tag{3}$$

式中：N为所调查全部物种数；n_i为第i个物种的个体数；m为样方中调查的物种数。

1.5 数据处理与统计

本文利用SPSS 21.0软件进行数据统计分析，采用ArcGIS 10.2、Origin 8.0、R-3.6.2的“vegan”包作图。

2 结果与分析

2.1 土壤盐碱化的离子特征分析

准噶尔盆地土壤盐分、pH及盐基离子统计如表1所示。土壤盐分含量为0.12~64.36 mg·g^{-1}，平均值为7.53 mg·g^{-1}，土壤偏向盐渍化。pH值为7.95~9.65，均值为8.63，土壤偏碱性。土壤Na^+、SO_4^{2-}、Cl^-的平均离子含量明显高于其他离子，因此研究区盐土类型主要为氯化物、硫酸盐土。变异系数(C_V)可以衡量研究区盐基离子的离散程度，C_V≤0.1为弱变异性；0.1<C_V<1为中等变异；C_V≥1为强变异[10]。总体上，土壤pH值变幅较小，土壤盐分和盐基离子Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、CO_3^{2-}含量为强变异(C_V分别为1.7、1.29、1.6、1.71)，表明pH在研究区分布具有均一性，而土壤盐分则表现为明显的不均一性。

比较不同土层土壤含盐量及盐基离子特征(表2)，盐分、pH和八大离子的平均离子含量基本相等。0~20 cm土层的盐分、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、CO_3^{2-}、HCO_3^-含量的平均值高于20~40 cm土层，表明研究区土壤盐分呈表层富集现象。20~40 cm土层Na^+和Cl^-、SO_4^{2-}含量的平均值高于0~20 cm土层。相关性分析表明(表3、表4)，0~20 cm、20~40 cm土层的盐

表1　准噶尔盆地土壤盐分、pH与盐基离子统计分析

Tab. 1　Statistical analysis of soil salinity, pH and base ions in Junggar Basin

指标	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数	偏度	峰度
盐分/mg·g^{-1}	64.36	0.12	7.53	8.43	1.12	-5.81	35.63
pH	9.65	7.95	8.63	1.36	0.16	4.15	24.69
K^+/mg·g^{-1}	0.63	0.01	0.11	0.10	0.89	2.95	10.98
Na^+/mg·g^{-1}	52.32	0.01	3.56	6.05	1.70	6.30	48.56
Ca^{2+}/mg·g^{-1}	2.45	0.01	0.70	0.62	0.89	0.58	-0.54
Mg^{2+}/mg·g^{-1}	0.43	0.01	0.06	0.07	1.29	2.90	10.17
Cl^-/mg·g^{-1}	21.19	微量	1.88	3.02	1.60	3.75	19.31
CO_3^{2-} /mg·g^{-1}	0.52	0.00	0.07	0.11	1.71	2.00	3.85
HCO_3^- /mg·g^{-1}	0.70	0.14	0.38	0.13	0.35	0.38	-0.55
SO_4^{2-} /mg·g^{-1}	26.08	0.01	6.20	5.47	0.88	0.99	1.06

表2　不同土层土壤盐分、pH、盐基离子含量

Tab. 2　Contents of soil salinity, pH and base ions in different soil layers

深度/cm	盐分/mg·g^{-1}	pH	K^+/mg·g^{-1}	Na^+/mg·g^{-1}	Ca^{2+}/mg·g^{-1}
0~20	7.204±5.107a	8.731±0.148a	0.130±0.124a	3.135±5.752ab	0.708±0.753a
20~40	7.034±10.188a	8.743±0.043a	0.104±0.126a	3.708±6.421a	0.670±0.709ab
深度/cm	Mg^{2+}/mg·g^{-1}	Cl^-/mg·g^{-1}	CO_3^{2-} /mg·g^{-1}	HCO_3^- /mg·g^{-1}	SO_4^{2-} /mg·g^{-1}
0~20	0.063±0.106a	1.573±0.389b	0.077±0.015a	0.407±0.019a	5.836±0.635ab
20~40	0.047±0.066a	2.066±0.260a	0.063±0.013b	0.352±0.015b	6.166±0.612a

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)，相同小写字母表示差异不显著(P>0.05)。

分与EC、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 呈正相关，与pH、CO_3^{2-} 、HCO_3^- 呈负相关。0~20 cm土层，与Mg^{2+}呈不显著正相关，与EC、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}呈显著正相关；20~40 cm土层盐分与EC、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 都表现为显著正相关。

2.2　土壤盐渍化分布特征

土壤盐渍化程度划分如图2a所示。采样区中度、重度盐渍化占比较大，分别为34.5%和26.5%，且以链状或条带状分布在准噶尔盆地。11.9%的样地为轻度盐渍化，呈点状分布。总体上盐土所占比重

表3　0~20 cm土层土壤盐分、pH、盐基离子含量的Pearson相关关系

Tab. 3　Pearson correlations of soil salinity, pH and base ion contents in 0~20 cm soil layer

	pH	EC	盐分	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}
pH	1.000										
EC	−0.410**	1.000									
盐分	−0.433**	0.896**	1.000								
K^+	0.079	0.247*	0.223*	1.000							
Na^+	−0.102	0.494**	0.602**	0.531**	1.000						
Ca^{2+}	−0.393**	0.575**	0.621**	0.351**	0.354**	1.000					
Mg^{2+}	0.012	0.136	0.194	0.364**	0.281**	0.170	1.000				
Cl^-	−0.354**	0.770**	0.902**	0.192	0.601**	0.493**	0.278**	1.000			
CO_3^{2-}	0.470**	−0.210*	−0.266*	0.057	−0.182	−0.462**	0.260*	−0.142	1.000		
HCO_3^-	0.432**	0.005	−0.037	0.175	0.050	−0.395**	0.036	−0.082	0.431**	1.000	
SO_4^{2-}	−0.326**	0.723**	0.685**	0.367**	0.431**	0.706**	0.072	0.374**	−0.413**	−0.067	1.000

注：*、**分别表示P<0.05、P<0.01；EC表示电导率。下同。

表4　20~40 cm土层土壤盐分、pH、盐基离子含量的Pearson相关关系

Tab. 4　Pearson correlations of soil salinity, pH and base ion contents in 20~40 cm soil layer

	pH	EC	盐分	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}
pH	1.000										
EC	−0.201	1.000									
盐分	−0.250*	0.732**	1.000								
K^+	−0.081	0.237*	0.316**	1.000							
Na^+	0.015	0.431**	0.473**	0.570**	1.000						
Ca^{2+}	−0.441**	0.233*	0.474**	0.382**	0.123	1.000					
Mg^{2+}	−0.045	0.254*	0.301**	0.289**	0.487**	0.222*	1.000				
Cl^-	−0.126	0.597**	0.728**	0.327**	0.564**	0.195	0.362**	1.000			
CO_3^{2-}	0.428**	−0.110	−0.234*	−0.171	−0.118	−0.441**	−0.155	−0.135	1.000		
HCO_3^-	0.175	0.101	−0.113	−0.111	0.001	−0.477**	−0.066	−0.135	0.097	1.000	
SO_4^{2-}	−0.187	0.601**	0.752**	0.400**	0.292**	0.648**	0.223*	0.260*	−0.311**	−0.156	1.000

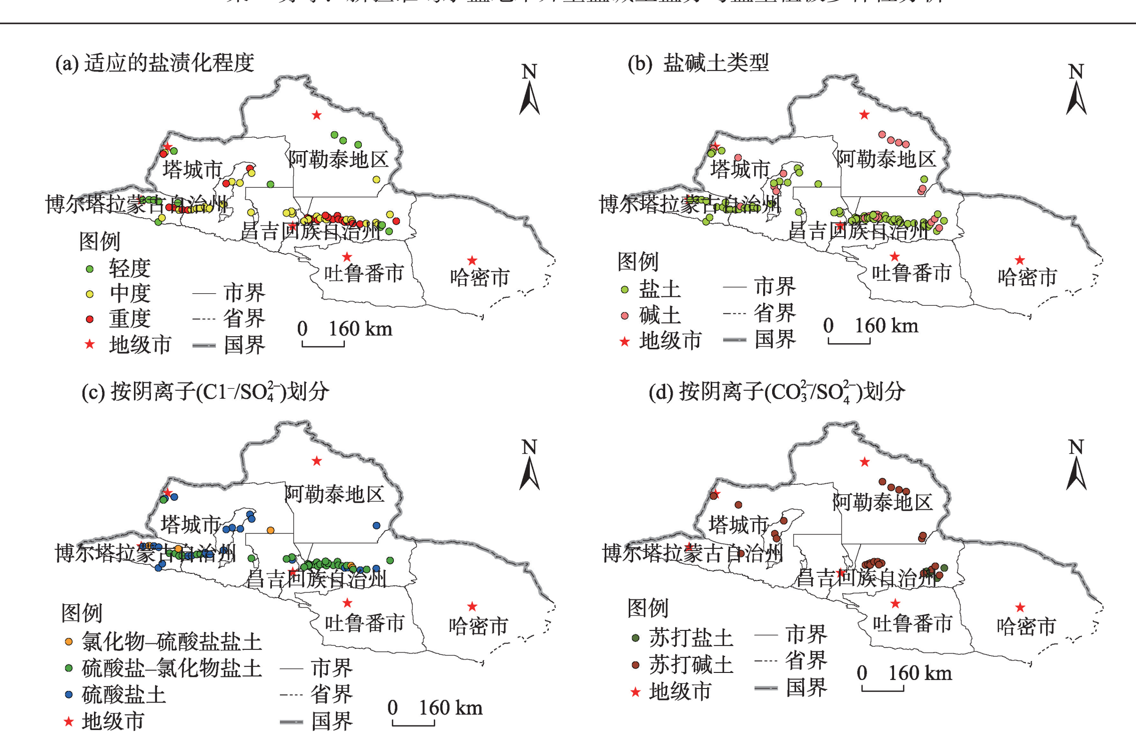


图2　准噶尔盆地不同盐土类型分布

Fig. 2　Spatial distributions of different saline soil types in Junggar Basin

大，为92.9%；碱土占7.1%。盐碱土类型划分如图2b所示，盐土以条带状分布而碱土则以点状分散在准噶尔盆地。不同阴离子所占比重划分盐土类型(图2c~d)表明，研究区以硫酸盐-氯化物盐土、硫酸盐盐土为主，苏打碱土为辅。

各地区土壤矿质含量的差异性使得盐土类型的分布特征不同，昌吉回族自治州和博尔塔拉蒙古自治州土壤矿物以氯化物、硫酸盐为主，硫酸盐-氯化物盐土和硫酸盐盐土呈条带状交错分布在两地区(图2)。苏打碱土、盐土则以面状形式分布在昌吉回族自治州，而呈斑点状分散在塔城市。由盐土类型比例统计(图3)可得，昌吉回族自治州的硫酸盐-氯化物盐土所占比例高，博尔塔拉蒙古自治州硫酸盐所占比例最高(图3c)；苏打碱土在阿勒泰地区所占比例高(图3d)。

2.3　盐生植被与土壤盐分、pH、盐基离子关系分析

植被调查结果如表5、表6所示，准噶尔盆地未开垦盐碱土的优势植被群落以一年生、多年生草本和小灌木为主，其中灌木优势种为琵琶柴(*Reaumuria songarica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、盐生假木贼(*Anabasis salsa*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)、里海盐爪爪(*Kalidium caspicum*)等，草本优势种为叉毛蓬(*Petrosimonia sibirica*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、新疆绢蒿(*Seriphidium kaschgaricum*)等。随着土壤盐渍化程度的加重，黎科、蓼科、柽柳科物种数目增多，而菊科的物种数目则降低。

盐生植被盖度、植被类型间接地反映土壤含盐量[10]。土壤盐渍化与盐生植被盖度、植被类型的关系如图4所示。准噶尔盆地植被平均盖度为30%~80%，且大多为真盐、泌盐植物。对准噶尔盆地未开垦盐碱土的土壤盐分、pH以及盐基离子含量与盐生植被多样性进行相关分析表明(图5、图6)，二次多项式回归能够较好地表达盐生植被与土壤含盐量的相互关系，土壤含盐量与Shannon-Wiener指数、Hurlbert指数呈极显著相关(R^2分别为0.560、0.775，P<0.01)。土壤盐分含量在5~10 mg·g^{-1}范围内时，随着土壤含盐量不断增加，Shannon-Wiener指数、Hurlbert指数都出现最大值。Pielou均匀度指数与土壤盐分呈现类似趋势。通过回归分析可知，准噶尔盆地盐生植被丰富度、均匀度与未开垦盐碱土pH值呈U型曲线关系。土壤pH在8.4~9.2之间，盐生植被的物种比较丰富，分布较均匀，但相关性不显著。物种Shannon-Wiener指数与土壤盐基离子含量表现为线性相关(图6)。物种Shannon-Wiener指数

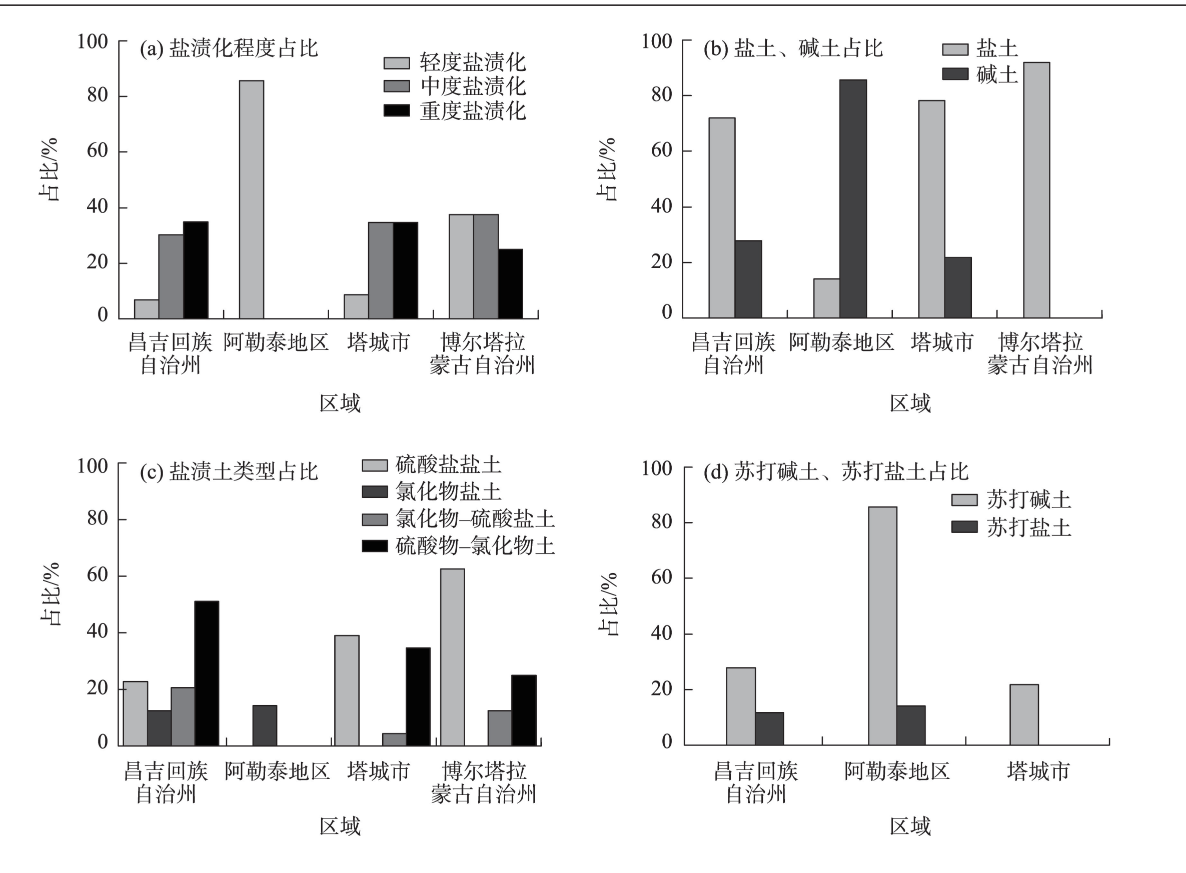


图3　不同地区盐碱土类型所占比例统计

Fig. 3　Statistics of the proportion of saline-alkali soil types in different regions

表5　不同区域的优势盐生植被群落

Tab. 5　Dominant halophytic vegetation communities in different regions

区域	优势物种	伴生物种
昌吉回族自治州	琵琶柴(*Reaumuria songarica*)	尖叶盐爪爪(*Kalidium cuspidatum*)
	梭梭(*Haloxylon ammodendron*)	心叶驼绒藜(*Ceratoides ewersmanniana*)
	盐生假木贼(*Anabasis salsa*)	里海盐爪爪(*Kalidium caspicum*)
	盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)	角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)
	新疆绢蒿(*Seriphidium kaschgaricum*)	齿稃草(*Schismus arabicus*)
	刺毛碱蓬(*Suaeda acuminata*)	樟味藜(*Camphorosma monspeliaca*)
	叉毛蓬(*Petrosimonia sibirica*)	鞑靼滨藜(*Atriplex tatarica*)
	骆驼蓬(*Peganum harmala*)	芨芨草(*Achnatherum splendens*)
	猪毛菜(*Salsola collina*)	芦苇(*Phragmites australis*)
阿勒泰地区	灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)	新疆绢蒿(*Seriphidium kaschgaricum*)
	琵琶柴(*Reaumuria songarica*)	柽柳(*Tamarix chinensis*)
	驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago*)	盐生假木贼(*Anabasis salsa*)
	盐生草(*Halogeton glomeratus*)	骆驼蓬(*Peganum harmala*)
	角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)	
塔城市	唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)	樟味藜(*Camphorosma monspeliaca*)
	芨芨草(*Achnatherum splendens*)	叉毛蓬(*Petrosimonia sibirica*)
	刺毛碱蓬(*Suaeda acuminata*)	猪毛菜(*Salsola collina*)
博尔塔拉蒙古自治州	梭梭(*Haloxylon ammodendron*)	铃铛刺(*Halimodendron halodendron* var. *halodendron*)
	琵琶柴(*Reaumuria songarica*)	甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)
	猪毛菜(*Salsola collina*)	罗布麻(*Apocynum venetum*)
	骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)	唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)

表6　不同区域的优势盐生植被群落物种统计

Tab. 6　Species statistics of dominant halophytic vegetation communities in different regions

区域	黎科	蓼科	禾本科	菊科	柽柳科
阿勒泰地区	135	0	0	9300	0
博尔塔拉蒙古自治州	1383	93	47	0	0
塔城市	3980	0	227	2696	144
昌吉回族自治州	26038	378	181	3701	309

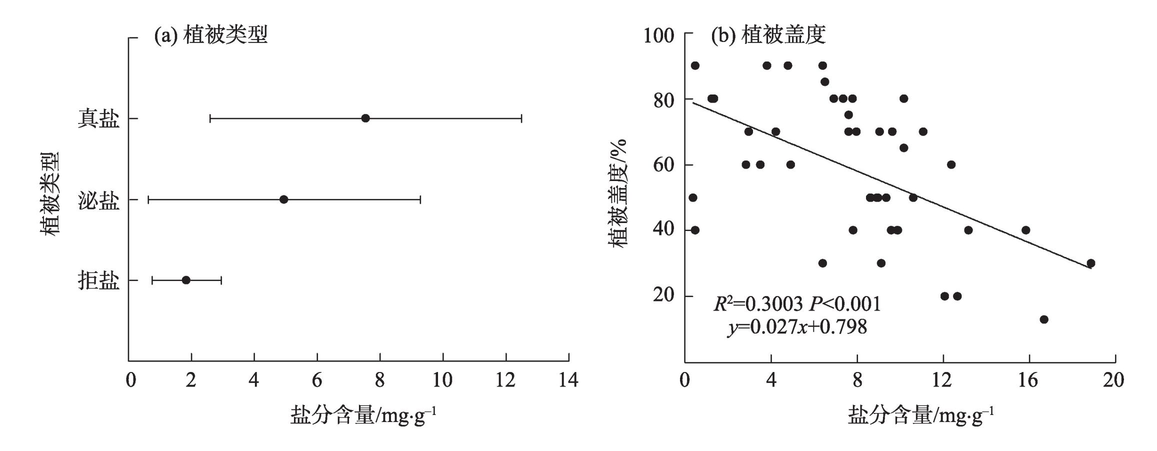


图4　土壤盐分含量与盐生植被类型、盖度的关系

Fig. 4　Relationship between soil salinity content and vegetation types and coverage

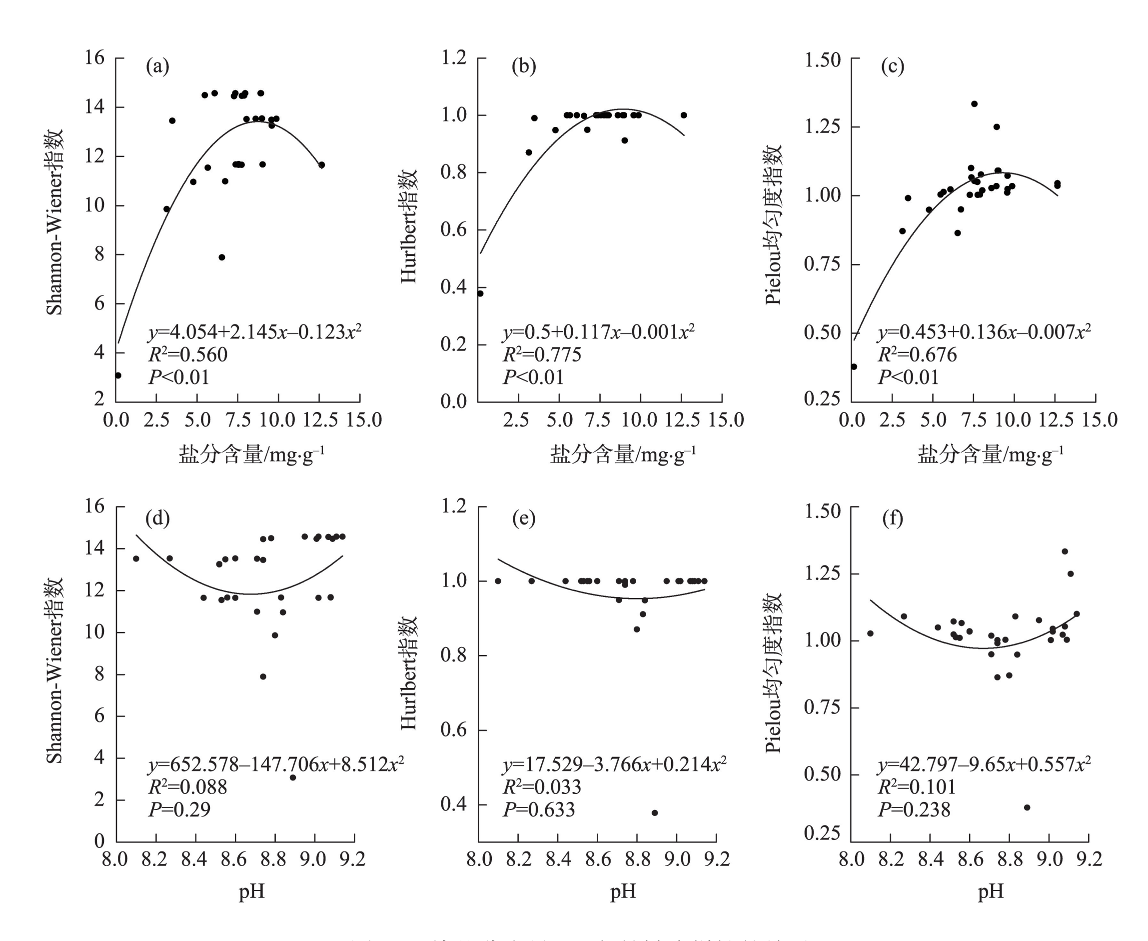


图5　土壤盐分含量、pH与植被多样性的关系

Fig. 5　Relationship between soil salinity content, pH and vegetation diversity

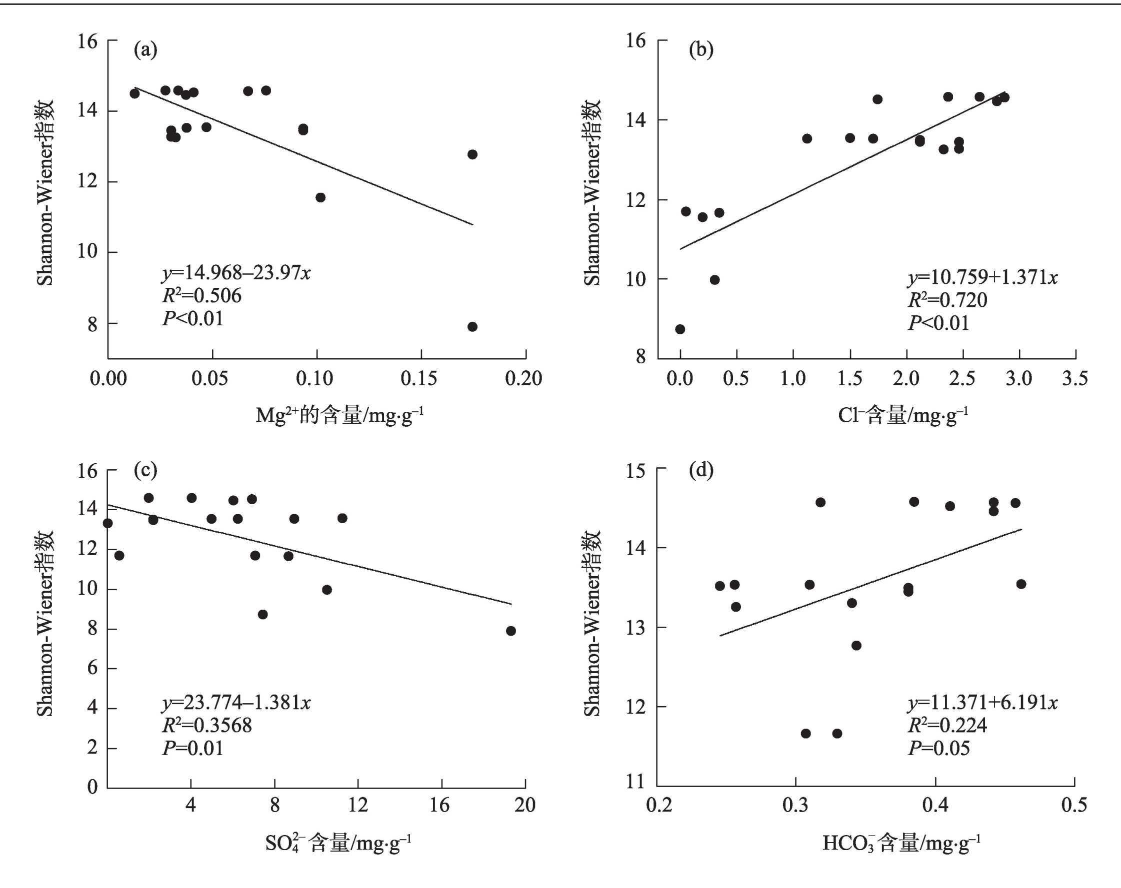


图6　土壤盐基离子含量与植被多样性的关系

Fig. 6　Relationship between soil base ion content and vegetation diversity

与Mg^{2+}、SO_4^{2-}表现为负相关关系，与Cl^-、HCO_3^-呈正相关，而CO_3^{2-}、Na^+、K^+、Ca^{2+}与物种Shannon-Wiener无显著相关关系。

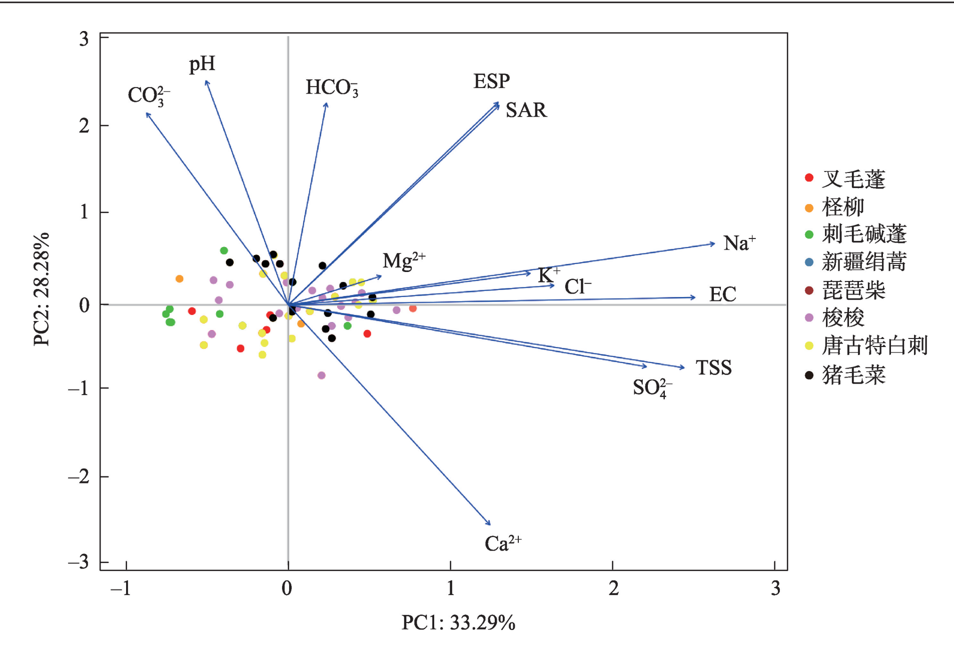
盐碱土影响植被群落的物种组成，只有适应这种恶劣环境的物种才能生存下来。本文用PCA进一步研究影响未开垦盐碱土盐生植被优势种分布特征的环境因素。PCA结果表明（表7、图7），第一轴和第二轴的方差贡献率分别为33.29%、28.28%，说明前两轴数据可以解释土壤因子与盐生植被优势种的相互关系。与第一轴相关的土壤变量为EC、总含盐量（TSS）、Na^+，与第二轴相关的土壤变量为碱化度（ESP）、钠吸附比（SAR）、pH、HCO_3^-、CO_3^{2-}，这表明上述指标是影响盐生植被优势种分布的主要因子（表7）。沿着PCA第一轴从左到右，pH、CO_3^{2-}含量逐渐下降，而土壤含盐量、SO_4^{2-}逐渐增加；沿着第二轴从下往上，pH、SAR、ESP含量逐渐增加，TSS、Ca^{2+}、SO_4^{2-}含量逐渐降低。琵琶柴、梭梭、猪毛菜、柽柳与第一轴呈正相关关系（图7），这4种植物主要分布在昌吉回族自治州、塔城市、博尔塔拉蒙古自治州（表5），而这3个地区的盐土类型分别为硫酸盐土、氯化物盐土、硫酸盐-氯化物盐土（图3），这说明土壤盐分是影响这4种盐生植物分布的主要因子。

表7　主成分分析（PCA）前两轴土壤因子的特征向量

Tab. 7　Eigenvectors of soil factors in the first two axes of PCA

环境变量	pH	EC	TSS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
PC1	–0.2926	1.4479	1.4097	0.8615	1.5178	0.7182	0.3305
PC2	1.3612	0.0453	–0.3821	0.1920	0.3725	–1.3358	0.1756
环境变量	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	SAR	ESP	
PC1	0.9463	–0.5045	0.1359	1.2755	0.7510	0.7477	
PC2	0.1184	1.1653	1.2259	–0.3754	1.2115	1.2304	

注：EC为电导率，TSS为总含盐量，ESP为碱化度，SAR为钠吸附比。



注：EC为电导率，TSS为总含盐量，ESP为碱化度，SAR为钠吸附比。

图7　盐生植被优势种与土壤性状的关系

Fig. 7　Relationship between dominant specieses of halophytic vegetation and soil properties

唐古特白刺、叉毛蓬、刺毛碱蓬与第二轴存在相关关系，而这3种植物分布的地区都有苏打碱土分布。猪毛菜、梭梭、琵琶柴与各个指标都有关联，但刺毛碱蓬、唐古特白刺则与pH、CO_3^{2-}相关性较强，表明土壤pH影响盐生植被优势种分布。

3　讨 论

地壳构造运动形成了准噶尔盆地，由于气候干旱，降水较少，地形封闭形成了独特地盐渍化景观。从不同土层深度来看，准噶尔盆地土壤盐分呈表层聚集。从变异特征来看，土壤盐分和盐基离子具有空间异质性特征。昌吉回族自治州以氯化物-硫酸盐盐土为主，这与王丹丹等[24]关于渭干河绿洲地区土壤盐分特征、张芳等[25]关于奇台土壤盐碱化特征得出结果类似。这可能与梭梭、琵琶柴、柽柳等盐生植物广泛分布有关。梭梭根部吸收大量Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}，使得盐分在土壤表层累积[26]。该地区的土壤类型为灰漠土，土壤孔隙度大且盐分由于土壤水分蒸发易析出地表[27]。博尔塔拉蒙古自治州盐土类型为硫酸盐土，可能是因为构造断陷盐湖、阿拉山口位于该地区，盐湖中含有Cl^-、SO_4^{2-}和Na^+类型的砂粒和细粒在运移、滚动的过程中产生可溶性盐、碱影响周围土壤[28]。阿勒泰地区盐土类型为苏打碱土，与地区土壤母质（花岗岩体以Al^{3+}、Ca^{2+}碱性化学物质为主）、地下水矿化度高（以CO_3^{2-}、SO_4^{2-}为主）和柽柳等泌盐植被凋落物分解（其pH值呈碱性）有关[4]。其次，阿勒泰地区北高南低的地形[29]、上游区域的苏打碱土随河流迁移到下游，以链状形式聚集在土壤表层。

本研究结果表明，准噶尔盆地未开垦盐碱土其盐生植被优势建群种为藜科，藜科植被物种数目随着土壤盐分含量的升高而增多，菊科物种数目则降低。这与钱亦兵等[19]对准噶尔盆地边缘部分荒漠植被覆盖特征的研究类似，是植被长期适应盐碱土环境的结果。随着研究区土壤盐分含量的升高，盐生植被由抗盐（拒盐）型向真盐（聚盐）型植被转变。随着土壤的盐渍化程度的加剧，盐生植被物种丰富度和均匀度指数并非线性拟合关系，而是二次多项式曲线关系。土壤盐分在5~10 mg·g^{-1}之间，Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数逐渐增加，超过10 mg·g^{-1}物种丰富度逐渐下降。这与大多数研究中认为中盐生境干扰使得荒漠生态系统植物多样性较高的结果相吻合[30-31,14]。产生这种现象的原因可能是由于不同生境条件下盐生植被都有一个最优盐分值，超出盐分范围，其物种丰度、多样性则会降低；其次，物种间的相互竞争、群落逆行演替也使得多样性降低[32]。从酸碱度的角度看，未开垦

盐碱土的pH与植被群落多样性表现为U型相关,但不显著,说明土壤pH值并非影响物种丰富度和多度的直接因子,但它可能会通过土壤其他指标(养分、盐分、水分等)对植物生活型、建群种等特征产生间接影响[33]。盐生植被优势种与土壤因子的PCA分析表明,土壤盐分、pH是影响未开垦盐渍化景观盐生植被优势种分布的主要因子。部分学者对新疆阜康荒漠植物群落多样性与土壤因子相互关系、干旱半干旱地区黑河湿地植物多样性研究、克拉玛依盐生植被多样性的空间分布特征等研究也得出类似结果,即土壤含盐量和酸碱度是影响荒漠景观植被多样性的关键因子[15,31,34]。

4 结 论

准噶尔盆地未开垦盐碱土作为土地资源的后备军,本文对其盐碱土的空间分布特征及其盐生植被覆盖特征进行研究,得出以下结论:

(1) 准噶尔盆地未开垦盐碱土平均离子含量 SO_4^{2-} >Cl^->Na^+,硫酸盐-氯化物盐土、苏打碱土所占比重大,为46.9%和26.5%。昌吉回族自治州盐土为硫酸盐-氯化物;博尔塔拉蒙古自治州以硫酸盐盐土为主;苏打碱土遍布整个采样区。

(2) 梭梭、柽柳、琵琶柴、猪毛菜等盐生植被广泛分布在昌吉回族自治州。博尔塔拉蒙古自治州以琵琶柴、骆驼刺为优势种。阿勒泰地区则以耐盐碱植物新疆绢蒿为优势种。塔城市盐生植被优势种为唐古特白刺、芨芨草。

(3) 准噶尔盆地未开垦土壤盐渍化景观内,土壤盐分与盐生植被多样性表现为二次曲线关系,而pH与植被丰富度呈U型相关。

参考文献(References)

[1] Jamil A, Riaz S, Ashraf M, et al. Gene expression profiling of plants under salt stress[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2011, 30(5): 435−458.

[2] Jiang Z, Ma B, Erinle K O, et al. Enzymatic antioxidant defense in resistant plant: *Pennisetum americanum* (L.) K. Schum during long-term atrazine exposure[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2016, 133: 59−66.

[3] 吕真真, 刘广明, 杨劲松. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 289−295. [Lü Zhenzhen, Liu Guangming, Yang Jinsong, et al. Soil salinity characteristics of Manas River vally in Xinjiang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 289−295.]

[4] 魏阳, 丁建丽, 王飞, 等. 新疆玛纳斯流域非农业种植盐碱性空间异质性[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7655−7666. [Wei Yang, Ding Jianli, Wang Fei, et al. Analysis of the spatial variational characteristics of saline-alkaline soil types in non-agriculture land in Manas River Basin, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7655−7666.]

[5] 米晓军, 任雯, 雒琼, 等. 新疆准噶尔盆地未开垦盐碱地土壤重金属评价及其来源[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 824−834. [Mi Xiaojun, Ren Wen, Luo Qiong, et al. Evaluation and their sources of heavy metals in uncultivated saline-alkaline soil in the Junggar Basin, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 824−834.]

[6] Wang J, Ding J, Abulimiti A, et al. Quantitative estimation of soil salinity by means of different modeling methods and visible-near infrared (VIS-NIR) spectroscopy, Ebinur Lake Wetland, northwest China[J]. PeerJ, 2018, 6: e4703, doi: 10.7717/peerj.4703.

[7] Rad M N, Shokri N. Nonlinear effects of salt concentrations on evaporation from porous media[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(4): L04403, doi: 10.1029/2011GL050763.

[8] Acosta J A, Faz A, Jansen B, et al. Assessment of salinity status in intensively cultivated soils under semiarid climate, Murcia, SE Spain[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(11): 1056−1066.

[9] 阿斯古丽·木萨, 阿不都拉·阿不力孜, 瓦哈甫·哈力克, 等. 新疆克里雅绿洲土壤盐分、pH和盐基离子空间异质性分析[J]. 土壤, 2017, 49(5): 1007−1014. [Musa Asigul, Abliz Abdulla, Halik Wahap, et al. Spatial heterogeneity of soil salinity, pH and base cations in Keriya Oasis of Xinjiang[J]. Soils, 2017, 49(5): 1007−1014.]

[10] 胡佳楠, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 于田绿洲土壤含盐量的空间异质性研究[J]. 土壤, 2017, 49(1): 162−170. [Hu Jianan, Tiyip Tashpolat, Nurmemet Ilyas, et al. Spatial variability of soil salt content in Yutian Oasis[J]. Soils, 2017, 49(1): 162−170.]

[11] Zhao Yong, Abuduwaili J, Yimit H. The occurrence, sources and spatial characteristics of soil salt and assessment of soil salinization risk in Yanqi Basin, northwest China[J]. PloS One, 2014, 9(9): e106079, doi: 10.1371/journal.pone.0106079.

[12] 方丽章, 李艳红, 李发东, 等. 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间异质性分析[J].农业环境科学学报, 2019, 38(1): 163−173. [Fang Lizhang, Li Yanhong, Li Fadong, et al. Analysis of spatial variation of soil moisture-salinity-nutrient in Ebinur Lake wetlands, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38 (1): 157−167.]

[13] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 王庆峰, 等. 天山西部伊犁河流域土壤盐分特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(6): 774−781. [Eziz Mamattursun, Yimit Hamid, Wang Qingfeng. Characteristics of soil salinity in Ili River Valley, western Tianshan Mountains [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(6): 774−781.]

[14] 王盼盼, 李艳红, 张小萌. 艾比湖湿地植物群落变化对盐分环境梯度的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 29−33. [Wang Panpan, Li Yanhong, Zhang Xiaomeng. Responses of plant diversity

changes in the wetland of Lake Ebinur to salinity environment gradient[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 29−33.]

[15] 赵晓英, 何学敏, 杨晓东, 等. 艾比湖流域水盐变化对荒漠植物多样性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 76−82. [Zhao Xiaoying, He Xuemin, Yang Xiaodong, et al. Effects of soil moisture and salt on desert plant biodiversity in Ebinur Lake Basin of Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 76−82.]

[16] Zhao S, Liu J J, Banerjee S, et al. Soil pH is equally important as salinity in shaping bacterial communities in saline soils under halophytic vegetation[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4550−4561.

[17] 徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 等. 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1142−1154. [Xu YuanJie, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(10): 1142−1154.]

[18] 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 2000—2015年伊犁河谷植被覆盖时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1551−1558. [Sun Guojun, Li Weihong, Zhu Chenggang, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation cover in Ili River Valley from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1551−1558.]

[19] 钱亦兵, 张立运, 吴兆宁, 等. 新疆准噶尔盆地边缘部分地段生态环境特征[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 30−36. [Qian Yibing, Zhang Liyun, Wu Zhaoning, et al. Characteristics of eco-environment in the margin regions of the Junggar Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1): 30−36.]

[20] 谌天德, 陈旭光, 王文科, 等. 准噶尔盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 15. [Shen Tiande, Chen Xuguan, Wang Wenke, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources and environmental problems in Junggar Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 15.]

[21] 张飞, 李怡博, 王东芳, 等. 精河绿洲盐渍土表层土壤盐分因子的空间变异及分布格局[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1): 64−73. [Zhang Fei, Li Yibo, Wang Dongfang, et al. Analysis of distribution patterns and spatial variability of soil salinity affecting factors in topsoil layer of salinized soil in Jinghe Oasis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(1): 64−73.]

[22] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 20−23. [Bao Shidan. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 20−23.]

[23] 郗金标, 张福锁, 毛达如, 等. 新疆盐生植物群落物种多样性及其分布规律的初步研究[J]. 林业科学, 2006, 42(10): 6−12. [Xi Jinbiao, Zhang Fusuo, Mao Daru, et al. Species diversity and distribution of halophytic vegetation in Xinjiang[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(10): 6−12.]

[24] 王丹丹, 于志同, 程猛, 等. 渭干河绿洲不同土地利用类型土壤盐分的变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 349−357. [Wang Dandan, Yu Zhitong, Cheng Meng, et al. Characteristics of soil salinity under different land use types in Weigan River Oasis [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 349−357.]

[25] 张芳. 新疆奇台绿洲土壤盐碱化特征及遥感监测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011. [Zhang Fang. Characteristics of soil salinization and remote sensing monitoring in Qitai Oasis, Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2011.]

[26] 朱宏伟, 夏军, 曹国栋, 等. 盐渍化弃耕地土壤盐分动态及其影响因素[J]. 土壤, 2013, 45(2): 339−345. [Zhu Hongwei, Xia Jun, Cao Guodong, et al. Dynamic change of soil salinity in salinization abandoned farm-land and affecting factors[J]. Soils, 2013, 45(2): 339−345.]

[27] 赵宣, 郝起礼, 孙婴婴. 典型毛乌素沙漠−黄土高原过渡带土壤盐渍化空间异质性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1761−1768. [Zhao Xuan, Hao Qili, Sun Yingying. Spatial heterogeneity of soil salinization and its influencing factors in the typical region of the Mu Us Desert-Loess Plateau transitional zone, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 1761−1768.]

[28] 吉力力·阿不都外力, 徐俊荣, 穆桂金, 等. 艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 928−939. [Abuduwaili Jilili, Xu Junrong, Mu Guijin, et al. Effect of soil dust from Ebinur Lake on soil salts and landscape of surrounding regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 928−939.]

[29] 叶尔波力·达吾提汗, 努尔江·铁格斯. 阿勒泰地区降水气候条件及变化特征分析[J]. 农家参谋, 2019(7): 166. [Dawutikhan Yerbori, Tiegs Nurjiang. Analysis of climatic conditions and variation characteristics of precipitation in Altay region[J]. The Farmers Consultant, 2019(7): 166.]

[30] 张林静, 岳明, 顾峰雪, 等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 658−662. [Zhang Linjing, Yue Ming, Gu Fengxue, et al. Coupling relationship between plant communities' species diversity and soil factors in ecotone between desert and oasis in Fukang, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 658−662.]

[31] 吴昊, 马昕昕, 肖楠楠, 等. 土壤物理性质对秦岭松栎林建群种形态及物种多样性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(5): 1068−1075. [Wu Hao, Ma Xinxin, Xiao Nannan, et al. Effects of soil physical properties on morphological traits of constructive trees and species diversity of pine-oak mixed forest in Qinling Mountains[J]. Soils, 2020, 52(5): 1068−1075.]

[32] 张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等. 基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5714−5722. [Zhang Xueni, Lü Guanghui, Yang Xiaodong, et al. Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5714−5722.]

[33] 王静娅, 王明亮, 刘广明, 等. 盐渍化弃耕地典型盐生植被抗逆性与恢复重建过程分析[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(1): 129−136. [Wang Jingya, Wang Mingliang, Liu Guangming, et al. Analysis of the typical halophytic vegetation resistance and restoration

process in abandoned salinized field[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(1): 129−136.]

[34] 赵敏, 赵锐锋, 张丽华, 等. 基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4116−4126. [Zhao Min, Zhao Ruifeng, Zhang Lihua, et al. Plant diversity and its relationship with soil factors in the middle reaches of the Heihe River based on the soil salinity gradient[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 4116−4126.]

Salinity characteristics and halophytic vegetation diversity of uncultivated saline-alkali soil in Junggar Basin, Xinjiang

LIANG Meng[1,2,3], MI Xiaojun[1,2,3], LI Chenhua[1,2], ZHAO Jin[1,2], WANG Yugang[1,2], MA Jian[1,2], Hu Jiangling[4,5]

(1. State Key laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Fukang National Station of Desert Ecosystem Observation and Research, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 4. School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 5. Research Center of Silk Road Economic Belt Urban Development, Key Research Base of Humanities and Social Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: Researchers are increasingly paying attention to soil salinization, which is one of the most serious ecological problems in arid areas. Soil salinization worldwide is expected to increase by more than 50% by 2050. The area of soil salinization in Xinjiang of China is 1336.4×10^4 hm^2. The uncultivated saline-alkali soil area in the Junggar Basin accounts for 27% of the saline soil area in Xinjiang. This paper selected the Junggar Basin as the study area. Soil salinity, pH, EC value, eight ions, and other indexes were measured. Multivariate statistics and principal component analysis were adopted to study the distribution characteristics of saline-alkali soil and the diversity of halophytic vegetation in this area. The characteristics of salt and base ions in different soil layers were analyzed by multivariate statistics. Pearson correlation analysis was used to analyze the correlation between soil salinity and base ions. Principal component analysis (PCA) was used to study the main soil factors affecting the distribution of dominant species in halophytic vegetation. The results showed that: (1) the study area was primarily composed of sulfate-chloride and sulfate soils. In Changji Hui Autonomous Prefecture and Bortala Mongol Autonomous Prefecture, moderate and severe sulfate-chloride and sulfate soils were distributed in the form of a chain or strip. Soda saline soil and soda alkaline soils were primarily distributed in point form in the Altay Prefecture. (2) Dilute salt vegetation, such as *Haloxylon ammodendron* and *Petrosimonia sibirica*, is dominant in Changji Hui Autonomous Prefecture. Salt-bearing vegetation, such as *Reaumuria songarica* and *Alhagi sparsifolia*, is dominant in Bortala Mongol Autonomous Prefecture. (3) The quadratic polynomial expresses the relationship between soil salinity and vegetation diversity. The Shannon-Wiener index, Hurlbert index, and Pielou evenness index reached their maximum value when the soil salinity was 5−10 $mg\cdot g^{-1}$. Halophytic vegetation species were abundant and evenly distributed within the pH range of 8.4 to 9.2. (4) PCA analysis of dominant halophyte species and soil properties showed that soil salinity is the key factor affecting the distribution of *Reaumuria songarica*, *Haloxylon ammodendron*, *Salsola collina*, and *Tamarix chinensis*, whereas. *Suaeda acuminata* and *Nitraria tangutorum* were primarily affected by soil pH and CO_3^{2-}. This study will provide theoretical support for the rational utilization of uncultivated land resources and ecological restoration.

Key words: uncultivated saline-alkali soil; salinity; halophytic vegetation diversity; Junggar Basin